

평판형 영구 자석 BLDC 전동기의 코킹 토크 저감을 위한 특성 해석

조원영, 이인재, 김병국, 김태현, 황동원, 조윤현, 구대현*

동아대학교, *한국 전기연구원

Characteristics Analysis for Reduction of Cogging Torque in a Novel Axial Flux Permanent Magnet BLDC Motor

WonYoung JO, InJae LEE, ByungKuk KIM, TaeHyun KIM, DongWon HWANG, YunHyun CHO, DaeHyun KOO*
Donga University, *Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract – In this paper, the design and field analysis of the novel axial flux type permanent magnet (AFPM) motor with double stator and single rotor are investigated. The various design schemes of AFPM based on 3D finite element method are proposed. The effects of slot shapes, various magnetization of PM, and skewing on the cogging torque and average torque have been investigated in detail. From the results, we can improve the cogging torque and average torque characteristics.

1. 서 론

영구자석 평판형 BLDC 전동기(이하 평판형 전동기라 함)는 같은 크기와 같은 무게를 지닌 다른 전동기에 비해 일반적으로 단위 체적당 대용량 및 고토크를 발생할 수 있다. 그러나 일반적으로 동기 전동기에 비해 토크 특성은 떨어지지만, 제어성과 관측성이 용이하며, 홀소자를 이용한 값싼 앤코더의 사용으로 가격경쟁력에서 우수하다. 특히 영구 자석형 전동기는 기하학적 형상에 따른 자기적 특성으로 정밀 토크제어용으로 개발하기 위해서는 코킹 토크의 영향을 최소화하는 연구가 필요하다.

토크 리플의 저감은 평판형 전동기 설계에 있어서 매우 중요한 요소이다. 왜냐하면 평판형 전동기는 공극 단면이 축과 수직을 이루므로 축과 평행한 방향의 자속에 의하여 전동기의 토크가 형성되며, 일반 전동기에 비해 고에너지 밀도의 구조로 되어 있으므로 토크 리플은 전동기의 특성과 직접적인 연관이 있다. 이 토크 리플은 전동기내 고정자나 회전자의 슬롯 구조에 의해 발생하고, 발생 토크에 1차적인 리플 성분을 야기시킨다. 영구 자석형 기기에 대한 코킹 토크 저감 기술은 일반적으로 고정자 치 폭의 변화, 영구 자석의 자화 방향을 고려한 형상이나 스류의 변화 등 여러 가지를 들 수 있다. 그러나 코킹 토크와 평균 토크 사이에는 밀접한 연관성이 있기 때문에 동시에 두 가지 목적을 달성시키는 것은 매우 어려운 문제이다.

본 논문에서는 슬롯의 형상 및 스류, 영구 자화 분포에 의한 코킹 토크와 전체 평균 토크에 미치는 영향에 대한 연구 결과를 보여준다. 따라서 평판형 전동기의 설계 과정에 대한 정립이 우선시 되어야 할 것이며, 3차원 유한 요소법에 근거하여 설계에 대한 신뢰성을 확보해 나갈 것이다. 또한 코킹 토크와 평균 토크에 대한 슬롯 형상과 영구 자석 자화 방향 및 스류의 영향을 세부적으로 검토한다. 그 결과로써 코킹 토크와 평균 토크 특성을 향상 시킬 수 있을 것이다. 여기서는 해석의 정확성을 위해 3차원 유한요소법을 사용하였고, 제어 방식으로는 PWM을 이용한 구형파 2상 구동 방식을 선택하였다.

2. 해석모델 및 해석방법

2.1 평판형 BLDC 전동기의 구조 및 사양

기존의 평판형 전동기는 일반적으로 코어리스 전동기로서 고정자 슬롯에 자심이 없는 구조로 그 크기가 소형이며, 코킹 토크를 최소로 요구하는 가전제품용이나 사무기기용으로 주로 개발되었다. 철심이 있는 경우에도 롤링한 규소강판을 절단한 고정자 코어의 형태로 제작상 어려움이 많다.

반면에 본 논문에서 제안한 평판형 전동기는 코어의 구성이 기존의 평판형 전동기와는 달리 치 코어와 평판 적층 코어 및 고정 프레임으로 나누어지며, 코어 조립은 평판 적층 코어에 치 코어를 삽입하고, 고정자 프레임에 의해 장착되는 구조로 되어 있다. 고정자 코어는 돌극형 구조의 슬롯 코어로 적층되어 있으며, 회전자는 고정자 양면에 마주보는 영구 자석과 고정 프레임으로 구성되어 있는 양측면식 내전 평판형 전동기라 할 수 있다. 이 평판형 전동기의 구조는 그림 1과 같고, 주요 사양은 표 1에서 나타난다.

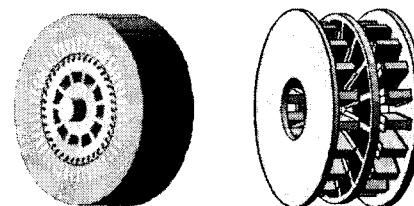


그림 1. 원통형과 평판형 형상 및 토크식 비교
 $T_d = K_s N_i B_{eq} D_i L$ $T_d = K_s N_i B_{eq} (D_{out}^2 - D_{in}^2)$

표 1. 평판형 BLDC 전동기 해석 모델 사양

Rated	Power	15[kW]
	Voltage	380[V]
	Current	4.87[A]
	Speed	1800[rpm]
	Torque	79.6[Nm]
Stator	Slot number	18
Rotor	Pole number	16
Winding	Turns/coil	90[turns]
	Conductor	$\phi 1.2[\text{mm}]$
	Diameter	
Magnet	B_r	1.28[T](20°)
	Material	NdFeB
	Coercivity	917[kA/m]
Air-gap		2[mm]
Winding connection		4-Y

2.2 평판형 전동기의 특성식

평판형 전동기의 고정자에 흐르는 전류와 미소 영구 자석에 의해 회전자에 작용하는 힘은 플레밍의 원론 법칙으로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T_d = mK_p N_1 I B_{mg} (D_{out}^2 - D_{in}^2) = K_t \times \text{Cross Section Area} \quad (1)$$

위의 식으로부터 그림 1에서 보는 바와 같이 적층 깊이에 비례하는 원통형 전동기의 토크식과는 달리 평판형 전동기에서는 내경과 외경의 깊이에 따라 토크가 결정됨을 알 수 있다.

영구 자석 한 극당 넓이에 의해 발생하는 공극 내 자속과 상당 고정자 전기자 권선에 의한 상당 역기전력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Phi_f = a_i \frac{\pi}{p} B_{mg} \int_{D_{in}/2}^{D_{out}/2} r dr = 0.125 a_i \frac{\pi}{p} B_{mg} D_{out}^2 (1 - k_d^2) \quad (2)$$

$$e_f = k_{ul} N_1 \frac{d\Phi_f}{dt} = 2\pi f k_{ul} N_1 \Phi_f \cos(\omega t) \quad (3)$$

식(2), 식(3)으로부터 출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_R = \eta \frac{m}{T} \int_0^T e_f(t) i(t) dt = \eta m K_p E_{PK} I_{PK} \quad (4)$$

여기서,

N_1	: 상당 권선수
m	: 상수
I	: 입력 전류
B_{mg}	: 공극 자속 밀도
D_{in}	: 내경, 외경
D_{out}	: : 공극 내 구형파 자계에 대한 계수
a_i	: 권선 계수
K_{ul}	: 극수
p	: D_{in}/D_{out}

2.3 해석 모델

본 연구에서는 그림 2에서 보인 바와 같이 고정자 치 형상 및 스큐 각도에 의한 토크 리플에 따라 전동기 특성을 해석하였다. 여기서는 그림 3과 같이 치 형상을 직사각형(case1) 및 부채꼴(case2)로 하였으며, 5°(case3), 10°(case4), 15°(case5)로 변화시킨 스큐는 부채꼴 형상에만 적용하여 그에 따른 특성을 살펴보았다. 평판형 전동기는 치형상 구조가 r -방향으로 달라짐에 따라 그 특성이 크게 달라짐을 살펴보기위해서이다. 단 스큐 각도는 15°이상일 경우 인접한 치와 겹치게 되므로 제한을 두었다.

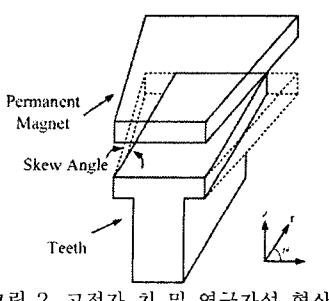
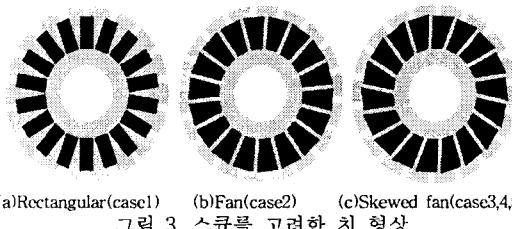


그림 2. 고정자 치 및 영구자석 형상



(a)Rectangular(case1) (b)Fan(case2) (c)Skewed fan(case3,4,5)
그림 3. 스큐를 고려한 치 형상

2.3 2차원 및 3차원 유한 요소법

기존의 원통형 전동기의 경우 계산 시간 단축 및 간단한 모델링 절차의 이점으로 2차원 해석이 주로 사용되고 있다. 그러나 2차원 해석의 경우 단면의 수직 방향으로 기하학적, 물리적 양이 일정하다는 조건이 필요하다. 본 논문에서의 해석 대상 전동기는 축방향으로 구조가 나열되어 있어 2차원 해석의 적용 대상이 될 수 없다. 따라서 평판형 전동기에 관한 해석 시 문제는 근본적으로 3차원 해석으로 해결할 수밖에 없다[4].

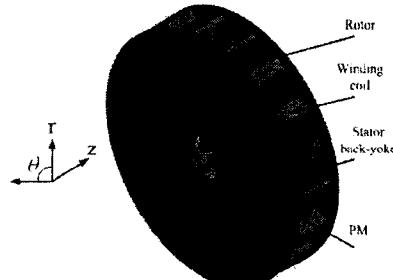


그림 4. 해석 모델의 요소 분할도(1/2모델)

그림 4는 대상 전동기의 1/2 해석 모델 요소 분할도를 나타내며 전체 요소수 및 절점수는 각각 536125, 101108이다. 공극의 요소는 해석의 정밀성을 위하여 4종으로 분할하였으며, 토크 및 자기력 특성은 맥스웰 응력법을 적용하여 계산하였다. 평판형 BLDC 전동기는 PWM을 이용한 구형파 2상 구동 방식으로 입력 전류가 5.87 A이고, 2상 전파방식으로 구동되는 정자계 문제로 보았다[4].

3. 해석 및 실험 결과

3.1. 치 형상에 따른 특성

고정자 치 형상 구조에 따른 전동기 특성을 알아보기 위하여 먼저 각 경우에 따른 코킹 토크 특성을 그림 6에서 비교해 보았다. 그림 5에서 볼 때, Case 1과 비교하여 Case 2, 3, 4, 5는 점차적으로 감소하여 최종적으로 58%이상 코킹 토크가 감소함을 알 수 있다. 그림 6은 무부하 1800rpm으로 동작하는 경우, 각 경우에 따른 토크 특성을 나타낸다. 여기서 볼 때, Case 1의 경우 토크 리플이 정격 토크의 3.46%인데 반해 Case 4까지 점차적으로 2.45%, 1.87%, 1.65%로 감소함을 알 수 있다. 그러나 Case 5의 경우 다시 4.06%로 증가함에 따라 코킹 토크의 감소는 반드시 토큰 토크 리플에 비례하지 않음을 알 수 있다.

그림 7은 무부하 1800rpm 기동시의 고정자 코어의 자속 밀도 분포와 고정자 및 회전자의 자속 벡터 분포도를 보여주며, 그림 8는 공극내 자속 밀도 분포를 나타낸다.

여기서 알 수 있듯이 공극 내 자속 밀도가 약 0.95[T]이 상을 나타냄에 따라 평판형 전동기의 설계 요건인 고자장 설계가 잘 이루어졌음을 알 수 있다.

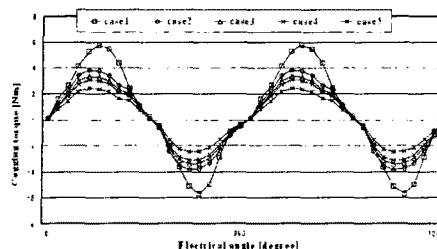


그림 5. 고정자 치 형상에 따른 코깅 토크 특성

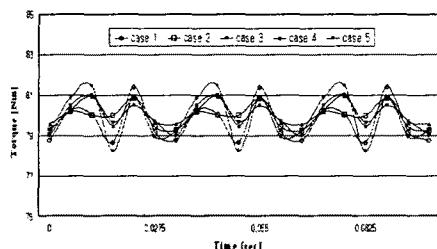


그림 6. 고정자 치 형상에 따른 토탈 토크 특성

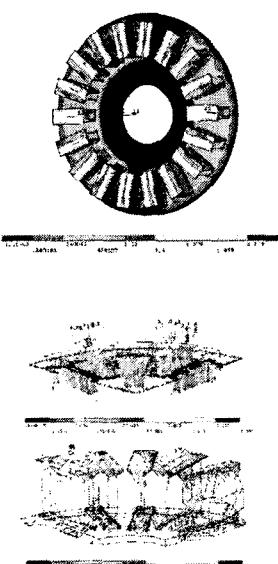


그림 7. 자속밀도 및 벡터 분포(무부하 1800rpm)

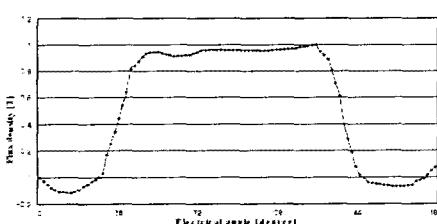


그림 8. 공극내 자속 밀도 분포($r=0.1\text{m}$)

4. 결 론

본 논문에서는 양측면식 내전 영구자석 평판형 BLDC 전동기를 대상으로 고정자 코어의 형상 변화에 따라 코깅 토크, 토탈 토크 등의 전동기 특성에 미치는 영향에 대한 연구에 대하여 다루었다. 효과적 해석을 위해 3차원 유한요소법을 사용하였고, 고정자 코어 형상 및 스큐각도에 따라 코깅 토크, 토탈 토크 등을 비교, 검토해보았다. 해석 결과로부터 고정자 코어 형상에 따른 코깅 토크 저감은 일반적으로 토탈 토크 리플의 저감과 비례 하나 반드시 비례하지 않음을 확인하였다. 또한 이로부터 고정자 코어의 형상은 Fan-shaped에 10°의 스큐를 가질 때 전동기 특성이 가장 좋은 것으로 나타남을 알 수 있었다.

평판형 전동기는 3상 PWM 인버터에 의한 구형파 2상 구동되므로 보다 정확한 특성 해석을 위해서는 스위칭, 구동 회로 등이 고려되어야 하고, 이는 전동기 특성 실험과의 비교해야 하는 등 이는 앞으로 지속적인 연구를 통해 보완해 나가야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 에너지관리공단의 에너지·자원기술개발사업의 지원으로 수행된 논문임을 밝힙니다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Aydin, S. Husang, and T. A. Lipo, Optimum design and 3D finite element analysis of non-slotted and slotted internal rotor type axial flux PM disc machines, Power Engineering Society Summer Meeting, pp. 1409-1416, 2001.
- [2] F. Caricchi, F. Crescimbini, O. Honorati, and E. Santini, Performance evaluation of an axial flux PM generator, Proceedings of International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 761-765, 1992.
- [3] M. Aydin, R. Qu and T. A. Lipo, Cogging torque minimization technique for multiple-rotor, axial-flux, surface-mounted-PM motors: alternating magnet pole-arcs in facing rotors, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Salt Lake City, 2003.
- [4] Z. Q. Zhu and D. Howe, Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet motors, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 15, No. 4, pp. 2000.
- [5] Y. D. Chun, S. Wakao, T. H. Kim, K. B. Jang and J. Lee, Multiobjective design optimization of brushless permanent magnet motor using 3D equivalent magnetic circuit network method, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2, pp. 1910-1913, 2004.